

## 用于稳定激光功率的数字控制系统

李营营<sup>1,2,3</sup>, 江志坤<sup>2,3</sup>, 王安琪<sup>2,3</sup>

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;

3. 清华大学 清华大学-中国计量科学研究院精密测量联合实验室, 北京 100084)

**摘要:** 在冷原子干涉仪的研究中, 常采用三个拉曼光脉冲实现对原子束的相干操控(分束、反射和合束)。拉曼激光的功率抖动会引起 Rabi 频率的变化, 从而带来严重的干涉相移噪声。这些噪声对用于高精度转动加速度测量的冷原子干涉仪来说是不可忽略的系统噪声, 因此实现拉曼激光的功率稳定对于实现高精度原子干涉是至关重要的。采用声光调制器(AOM)作为执行器, 设计了一套用于稳定激光功率的数字控制系统。在对 AOM 进行系统辨识和控制器仿真设计的基础上, 利用 Labview 程序实现了激光功率稳定的 PID 控制。测试结果表明, 在测量时间为 1 h 情况下, 激光功率的不稳定度由系统闭环前的 1.67% 降低到了系统闭环后的 0.19%, 极大地提高了干涉信号的稳定性, 同时也降低了系统噪声。

**关键词:** 激光功率稳定; 激光器与激光光学; 冷原子干涉仪; 虚拟仪器

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0406004

## Digital control system for higher laser power stability

Li Yingying<sup>1,2,3</sup>, Jiang Zhikun<sup>2,3</sup>, Wang Anqi<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Joint Institute of Measurement Science, Tsinghua-National Institute of Metrology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Three Raman pulses are usually adopted to make cold atomic beams to split, reflect and recombine when doing cold atom interferometry experiments. The stability of Raman laser power is as important as frequency, because it causes the Rabi ratio to change with it. When the Rabi ratio changes, the final phase difference between the two separated atom beams changes as well. It is a great disturbance for interferometry signal stability and also the signal to noise ratio. The effect is more than acceptable when it comes to atom interferometer used as high precision acceleration measurements. Keeping laser power stable can improve phase noise a great deal. Thus a digital control system was designed for higher laser power stability using an acousto-optical modulator (AOM) as a controller, and the feedbacks from the AOM were applied to compensate the power variation outside the cavity of a laser. After realizing the identification with the AOM and a simulation model for it based on the

收稿日期: 2015-08-25; 修订日期: 2015-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61473166)

作者简介: 李营营(1990-), 女, 硕士生, 主要从事冷原子束和冷原子干涉仪方面的研究。Email: lylaana@163.com

导师简介: 冯焱颖(1977-), 男, 副教授, 主要从事原子光学及其在惯性和磁场等精密测量技术领域的应用方面的研究。

Email: yfeng@tsinghua.edu.cn

identification results, an PID controller was programmed in the Labview language. Experimental results show that the the laser power instability can be reduced from 0.19% to 1.67% with the method under the measurement time of 1 h. And it works really well for the cold atom interferometer system.

**Key words:** laser power stability; lasers and laser optics; cold atom interferometer; Labview

## 0 引言

半导体激光器因其输出线宽窄、频率稳定、连续可调等优点,被广泛应用于各种技术领域。在很多实验中,不仅要求激光输出频率稳定,对激光输出功率的抖动也有较高的要求,如激光干涉<sup>[1-3]</sup>、大失谐光阱<sup>[4]</sup>、冷原子干涉<sup>[5-6]</sup>等研究。在冷原子干涉技术的研究中,常采用受激拉曼跃迁实现原子的相干操控(分束、反射和合束)。拉曼激光的功率抖动会引起原子与激光相互作用的 Rabi 频率的变化,从而带来干涉相移的噪声<sup>[7]</sup>。这些噪声对用于高精密度测量的冷原子干涉仪来说是不可忽略的系统噪声,因此实现拉曼激光的功率稳定对于实现高精度原子干涉器件,如原子干涉惯性传感器,具有很重要的作用。

激光功率稳定方法主要分为腔内功率稳定<sup>[8-9]</sup>和腔外功率稳定两种<sup>[3,10]</sup>。腔内功率稳定方法是将反馈控制信号引入激光器内部,通过控制激光器电流等方法实现激光输出功率的稳定。这种方法在实现功率稳定的同时,一般会带来激光输出频率的扰动。腔外功率稳定方法主要在激光谐振腔外通过一定的功率调制手段实现激光的功率稳定。这种方法由于不会对激光器本身引入额外噪声,同时具有灵活、实用等特点,所以被广泛使用。常见的腔外功率调制方法有机械调制、磁光调制、电光/声光调制等。机械调制通过改变光斑尺寸或激光偏振态来调节激光功率,调节精度低且易对原光路状态产生影响;磁光调制主要基于法拉第效应实现激光功率调节,响应速度慢且成本较高;电光调制与声光调制机理类似,与其它方法相比响应速度较快,尤其是声光调制技术所需的驱动功率小、热稳定性高。

目前常用的基于 AOM 的激光功率稳定技术一般采用模拟电路进行控制<sup>[9-10]</sup>。文中采用声光调制器作为执行器,通过 Labview 程序实现数字 PID 控制器,设计并实现了一套激光功率稳定系统。采用数字

PID 控制器,相对模拟控制器,具有系统简单、交互界面友好、数据观测实时和系统参数修改方便等优点。

## 1 实验系统

根据声光效应可知,当激光和超声波同时加载到 AOM 上,且入射光满足布拉格角时,AOM 出射光会发生衍射。其中一级衍射光效率与超声波功率具有如下关系<sup>[11]</sup>:

$$\eta = P_a \frac{\pi^2 M_2 L}{2H\lambda_0^2} \quad (1)$$

式中: $P_a$  为超声波功率; $M_2$  为晶体声光品质; $L$  为晶体长度; $H$  为晶体宽度; $\lambda_0$  为入射光波长。由上式可知,一级衍射光效率与超声波功率成正比,因此,当入射光功率发生抖动时,可通过控制超声波功率改变衍射光效率以实现一级衍射输出光的功率调节,进而主动控制获得输出激光的功率稳定。

实验中选取 AOM(MT110,AA)正一级衍射光作为出射光,压控振荡器 VCO(DRFA10Y,AA)用以产生超声波信号,其输出信号的频率和功率可通过改变调频输入端、调幅输入端所接电压实现单独控制。当调频输入端接 7.5 V 电压时,实际测量获得 VCO 输出信号功率与调幅输入端所接电压的关系如图 1 所示。由图 1 可知,在 4~5 V 范围内,VCO 输出信号功率更大,AOM 衍射效率更高,输出功率与输入电压具有很好的线性度。

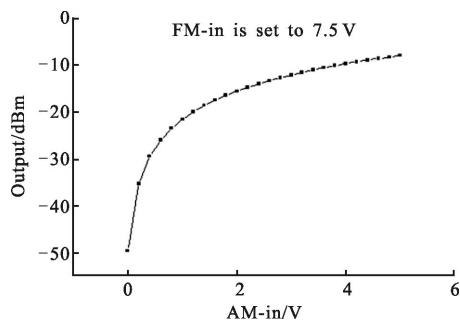


图 1 输出功率与调幅输入端电压的关系

Fig.1 Relationship between output power and voltage of AM-input

整个数字功率稳定系统如图 2 所示。待稳定的激光由半导体激光放大器(TA)产生,入射光经放大后得到功率约为 500 mW 的输出激光。该输出激光经过 AOM 调制,其一级衍射光为工作激光。将衍射光分为两束,分束光②约占总功率 1.5%,用于激光功率的测量,主光束①用于原子的相干操控。激光功率由光电探测器 PD(2032, Newport)实时测量,并通过数据采集卡(USB-6363, NI)传递到上位机中进行显示和后续处理。上位机中通过 LabVIEW 程序实现 PID 控制,所产生的控制信号由数据采集卡模拟输出通道传递到 VCO 调幅输入端,形成闭环回路,实现衍射激光功率的稳定。

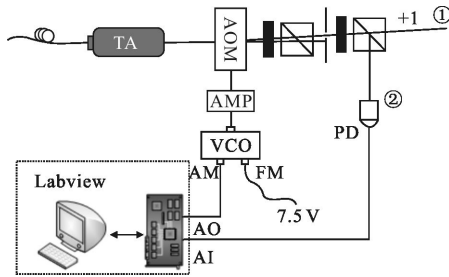


图 2 数字激光功率稳定系统实验装置

Fig.2 Experimental setup of digital laser power stability system

## 2 PID 控制器设计

首先对采用的 AOM 进行系统辨识以获得其传递函数,用于在 Matlab 中实现系统仿真和为 PID 控制器设计提供依据。图 3 为 AOM 系统辨识原理图。

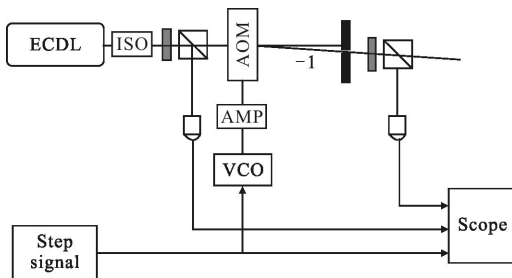


图 3 AOM 系统辨识原理图

Fig.3 Schematic of AOM system identification

选取 VCO 调幅输入端的驱动电压为输入量,衍射光的探测光电压为输出量,采用阶跃信号作为输入信号。所选用的 AOM 晶体上升时间在微秒量级,因此输入的阶跃信号上升时间应小于 1 μs。通过手

按直流电源方式获得的阶跃信号的上升时间在毫秒量级,无法满足实验要求。采用或非门芯片 CD4001B 制作一阶跃信号发生电路,其上升时延为 60 ns,输出高电压为 5 V,满足实验要求。阶跃信号输入 VCO 调幅输入端,因 CD4001B 输出电流太小,需再接一个用功放芯片 OPA551 焊接的驱动电路以提高其带负载能力。

当 VCO 调幅输入端接 5 V 阶跃信号时,所得 AOM 阶跃响应如图 4 所示。信号采样时间间隔为  $1.6 \times 10^{-7}$  s,对所采集到的阶跃响应信号进行滤波,借助 Matlab 系统辨识工具箱对其进行系统辨识。采用 ARX<sup>[12]</sup>模型,最小二乘法确定模型参数。考虑数据处理工作量及模型复杂程度,选取模型参数  $NN=[3 \ 4 \ 0]$ ,此时拟合所得曲线与 AOM 阶跃响应拟合度可达 98.1%,相应传递函数为:

$$H(z) = \frac{-0.030z^3 + 0.010z^2 - 0.080z + 0.013}{z^6 - 2.301z^5 + 1.885z^4 - 0.574z^3} \quad (2)$$

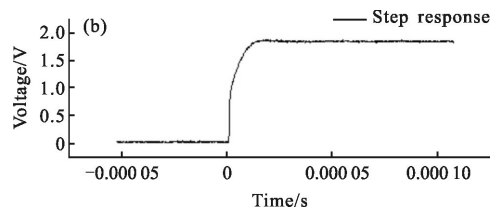
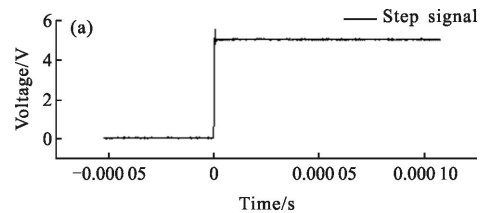


图 4 AOM 阶跃输入和阶跃响应

Fig.4 Step input and response of AOM

通过零阶保持器将 AOM 传递函数从离散域转化为连续域,可得:

$$H(s) = \frac{0.049z^3 - 2.379 \times 10^5 s^2 + 4.405 \times 10^{11} s + 1.229 \times 10^{18}}{s^3 + 2.323 \times 10^6 s^2 + 1.163 \times 10^{13} s + 3.416 \times 10^{18}} \quad (3)$$

根据已经辨识出的系统函数,在 Matlab 中用 Simulink 环境进行控制系统仿真,实现 PID 控制器的辅助设计。对控制器参数进行自动调整,可得控制器传递函数为:

$$H(s) = 4.4 + 1.8 \times 10^6 \frac{1}{s} - 7.8 \times 10^{-1} s \quad (4)$$

在实际的控制系统中,PID 控制器是通过上位

机中 LabVIEW 开发环境的 PID 控制模块<sup>[13]</sup>实现,同时可通过前面板的用户界面实时查看测量到的激光功率值,并对功率期望值、输入输出参数、PID 参数等进行修改和设置。VCO 的调幅输入端输入电压范围为 0~5 V,因此 LabVIEW 在输出模拟电压时,需限制电压范围以防止器件损坏。数据采集卡模拟输出信号接到 VCO 输入端之前,同样需要接一个驱动电路以提高带负载能力。根据已获得的控制器仿真结果,结合现场工程整定方法,完成程序中实际 PID 控制器参数的调节,最终实现激光功率稳定的闭环控制。

### 3 结果与讨论

为了测试所设计的激光功率稳定系统的效果,用激光功率计(PM100D, Thorlabs)分别测量并记录系统闭环控制前、后激光 L1 经过 AOM 的+1 级衍射光功率(图 2 中位置①处的分束激光功率)。采样时间间隔为 0.3 s,测量时间均为 1 h。测量结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,系统在闭环前后,激光功率的波动具有明显的变化。

选用不稳定性  $\delta$  来定量表征激光功率的稳定情况,即:

$$\delta = \frac{\sigma(p)}{\bar{p}} \quad (5)$$

式中: $\sigma(p)$ 、 $\bar{p}$ 分别为激光功率测量数据的均方值和均值。根据测量结果:闭环控制前,激光功率约 230 mW,最大起伏  $\Delta p=19.70$  mW,不稳定性  $\delta=1.67\%$ ;闭环控制后,激光功率最大起伏  $\Delta p=3.09$  mW,不稳定性  $\delta=0.19\%$ 。

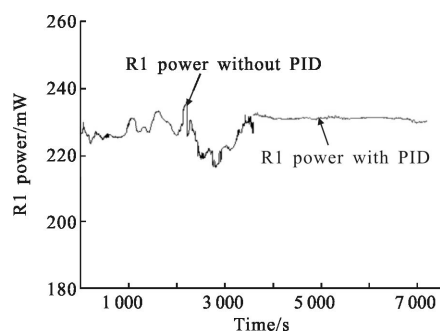


图 5 闭环控制前后激光功率测量图

Fig.5 Measurement chart of laser power before and after control

在将图 2 中位置②处的激光功率探测电压传送

到上位机的同时,用一数字万用表(34 411 A, Agilent)对其观测并记录,采样时间间隔 0.3 s,采样时长为 1 h。在闭环控制情况下,位置②处所得激光功率电压的不稳定度  $\delta=0.018\%$ ,比位置①处测得的不稳定度低一个量级。造成这个的主要原因是,为保证主光束功率足够大,②处分束激光是通过偏振分光棱镜(PBS)从主光束中分离出来,分光比例因子  $k$  与主光束偏振态有关。而 TA 在放大激光功率的同时,出射光偏振在入射光偏振的基础上,会在垂直方向上产生一个扰动。虽分光前已通过额外的 PBS 来滤除激光偏振的扰动,但扰动残留量仍然使比例因子  $k$  不为常数。闭环控制实际是稳定②处分束光的激光功率,因为比例因子  $k$  存在不确定性,导致①处主光束功率不稳定性变差。若改进光束分光方式,使激光分光功率比与偏振态无关,那么主光束的激光功率不稳定性有望进一步降低。

### 4 结论

文中设计并实现了一套数字激光功率稳定系统。该系统以 AOM 作为执行器,利用基于 Labview 的数字 PID 控制器,在腔外实现了对激光功率抖动的补偿。在测量时间为 1 h 的情况下,激光功率不稳定性由系统闭环前的 1.67% 降低到了闭环后的 0.19%。系统的功率稳定能力可以通过提高功率采样的稳定性来进一步提高。

在下一步的工作中,会将该功率稳定方法用于原子干涉仪两束拉曼激光的功率稳定。通过测量功率稳定前后原子干涉相移的变化,来定量评估拉曼激光功率稳定对原子干涉相位输出的影响,为进一步实现高精度原子干涉陀螺提供依据。

### 参考文献:

- [1] Nocera F. LIGO laser intensity noise suppression [J]. *Class Quan Grav*, 2004, 21: S481-S485.
- [2] Barr B W, Strain K A, Killow C J. Laser amplitude stabilization for advanced interferometric gravitational wave detectors[J]. *Class Quan Grav*, 2005, 22: 4279-4283.
- [3] Kwee P, Willke B, Danzmann K. Shot-noise-limited laser power stabilization with a high-power photodiode array [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2912-2914.
- [4] Savard T A, O'Hara K M, J E Thomas. Laser-noise-induced

- heating in far-off resonance optical traps[J]. *Physical Review A*, 1997, 56(2): R1095–R1098.
- [5] Gustavson T L. Precision rotation sensing using atom interferometry[D]. San Francisco: Stanford University, 2000.
- [6] Lu Xuanhui, Wang Jiangfeng. Quantum gyroscope based on an atom interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 293–296. (in Chinese)  
陆璇辉, 王将峰. 基于原子干涉的量子陀螺仪 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 293–296.
- [7] Kasevich M, Weiss D S, Riis E, et al. Atomic velocity selection using stimulated Raman transitions [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 66: 2297–2300.
- [8] Fu Yanjun, Zou Wendong, Xiao Huirong, et al. Optic power control of LD drive circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 626–630. (in Chinese)  
伏燕军, 邹文栋, 肖慧荣, 等. 半导体激光器驱动电路的光功率控制的研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 626–630.
- [9] Abbott R S, King P J. Diode-pumped Nd:YAG laser intensity noise suppression using a current shunt [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(2): 1349–1349.
- [10] Seifert F, Kwee P, Heurs M, et al. Laser power stabilization for second-generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Letters*, 2006, 32(13): 2000–2002. (in Chinese)
- [11] Xu Jieping. Theory, Design and Application for Acoustic-optical Devices [M]. Beijing: Science Press, 1982: 1–105, 153–205. (in Chinese)  
徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1–105, 153–205.
- [12] Tian Zheng. Dynamic Data Processing Theory and Method-Time Series Analysis [M]. Xi'an: Northwest Industry University Press, 1995. (in Chinese)  
田铮. 动态数据处理的理论与方法-时间序列分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [13] Li Yang, Xie Hui, Chen Kan. Design and realization of PID control system based on LabVIEW [J]. *China Measurement and Testing Technology*, 2008, 24(3): 74–76. (in Chinese)  
李扬, 谢晖, 陈侃. 基于 LabVIEW 的 PID 控制系统设计与实现[J]. 中国测试技术, 2008, 24(3): 74–76.